

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-147338

(43)Date of publication of application : 29.05.2001

(51)Int.Cl.

G02B 6/16

G02B 6/22

(21)Application number : 2000-272130

(71)Applicant : FUJIKURA LTD

(22)Date of filing : 07.09.2000

(72)Inventor : MATSUO SHOICHIRO
TANIGAWA SHOJI
AZEIRU TOMIO

(30)Priority

Priority number : 11256289

Priority date : 09.09.1999

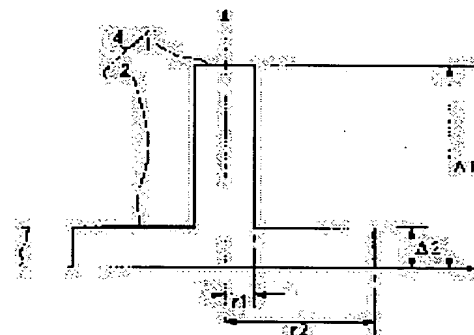
Priority country : JP

(54) DISPERSION-SHIFTED OPTICAL FIBER

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide technique for realizing either low cost or transmission characteristic or both, in an optical communication system which uses one or more kinds of optical fibers.

SOLUTION: This optical fiber is constituted of a center core 1, a stepped core 2 which is provided on the outer circumference of the center core and which has a refractive index lower than that of the center core 1, and a cladding 7, which is provided on the outer circumference of the stepped core 2 and which has a refractive index lower than that of the stepped core 2, and that, in the band of wavelength in use selected from 1,490-1,625 nm, it has a spectrum spread of 7-15 ps/km/nm, A_{eff} of 60-150 μm^2 , a dispersion slope of 0.09 ps/km/nm² or less, bending loss of 100 dB/m or lower, and a cut-off wavelength which essentially becomes single-mode propagation.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

12.04.2001

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]	3479272
[Date of registration]	03.10.2003
[Number of appeal against examiner's decision of rejection]	
[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]	
[Date of extinction of right]	

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2001-147338
(P2001-147338A)

(43) 公開日 平成13年5月29日 (2001.5.29)

(51) Int.Cl.⁷

G 0 2 B 6/16
6/22

識別記号

F I

G 0 2 B 6/16
6/22

テーマコード* (参考)

2 H 0 5 0

審査請求 未請求 請求項の数15 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2000-272130(P2000-272130)

(22) 出願日 平成12年9月7日 (2000.9.7)

(31) 優先権主張番号 特願平11-256289

(32) 優先日 平成11年9月9日 (1999.9.9)

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000005186

株式会社フジクラ
東京都江東区木場1丁目5番1号

(72) 発明者 松尾 昌一郎

千葉県佐倉市六崎1440番地 株式会社フジ
クラ佐倉事業所内

(72) 発明者 谷川 庄二

千葉県佐倉市六崎1440番地 株式会社フジ
クラ佐倉事業所内

(74) 代理人 100064908

弁理士 志賀 正武 (外3名)

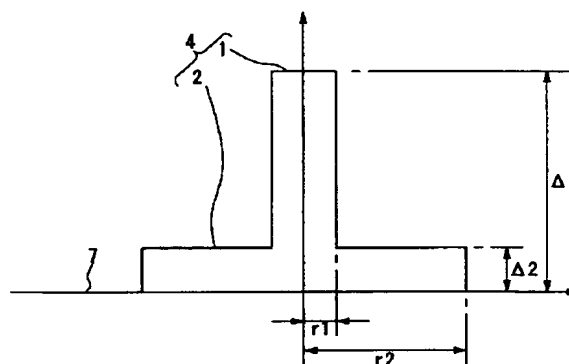
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 分散シフト光ファイバ

(57) 【要約】

【課題】 光ファイバを1種あるいは2種以上用いた光通信システムにおいては、低コスト化と伝送特性の一方あるいは両方を実現できる技術を提供することを課題とする。

【解決手段】 中心コア部1と、その外周上に設けられた、該中心コア部1よりも低屈折率の階段コア部2と、該階段コア部2の外周上に設けられた、該階段コア部2よりも低屈折率のクラッド7とからなり、1490～1625nmから選択される使用波長帯において、波長分散値が7～15ps/km/nm、 A_{eff} が60～150 μm^2 、分散スロープが0.09ps/km/nm²以下、曲げ損失が100dB/m以下であり、かつ実質的にシングルモード伝搬となるカットオフ波長を有するものを構成する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 1490～1625nmから選択される使用波長帯において、波長分散値が7～15ps/km/nm、 A_{eff} が60～150 μm^2 、分散スロープが0.09ps/km/nm²以下、曲げ損失が100dB/m以下であり、かつ実質的にシングルモード伝搬となるカットオフ波長を有することを特徴とする分散シフト光ファイバ。

【請求項2】 請求項1に記載の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部と、その外周上に設けられた、該中心コア部よりも低屈折率の階段コア部と、該階段コア部の外周上に設けられた、該階段コア部よりも低屈折率のクラッドとからなる屈折率分布形状を有することを特徴とする分散シフト光ファイバ。

【請求項3】 請求項2に記載の分散シフト光ファイバにおいて、 A_{eff} が60～110 μm^2 、分散スロープが0.08ps/km/nm²以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバ。

【請求項4】 請求項3に記載の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_1 、階段コア部の半径を r_2 、クラッドを基準にしたときの中心コア部の比屈折率差を Δ_1 、階段コア部の比屈折率差を Δ_2 としたとき、

Δ_1 が0.25～0.55%、
 r_2/r_1 が1.5～5.0、
 Δ_2/Δ_1 が0.025以上であって、かつ $-0.06 \times (r_2/r_1) + 0.5$ で求められる値以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバ。

【請求項5】 請求項3に記載の分散シフト光ファイバにおいて、波長分散値が7～11ps/km/nm、 A_{eff} が60～80 μm^2 、分散スロープが0.07ps/km/nm²以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバ。

【請求項6】 請求項5に記載の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_1 、階段コア部の半径を r_2 、クラッドを基準にしたときの中心コア部の比屈折率差を Δ_1 、階段コア部の比屈折率差を Δ_2 としたとき、

Δ_1 が0.4～0.5%、
 r_2/r_1 が3.5～5.0、
 Δ_2/Δ_1 が0.025以上であって、かつ $-0.06 \times (r_2/r_2) + 0.5$ で求められる値以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバ。

【請求項7】 請求項3に記載の分散シフト光ファイバにおいて、波長分散値が12～15ps/nm/km、 A_{eff} が90～110 μm^2 、分散スロープが0.08ps/km/nm²以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバ。

【請求項8】 請求項7に記載の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_1 、階段コア部の半径

を r_2 、クラッドを基準にしたときの中心コア部の比屈折率差を Δ_1 、階段コア部の比屈折率差を Δ_2 としたとき、

Δ_1 が0.4～0.5%、
 r_2/r_1 が2.0～4.0、
 Δ_2/Δ_1 が0.025以上であって、かつ $-0.06 \times (r_2/r_2) + 0.5$ で求められる値以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバ。

【請求項9】 請求項1に記載の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の外周上に、該中心コア部よりも高屈折率の周辺コア部が設けられ、該周辺コア部の外周上に、該周辺コア部よりも低屈折率のクラッドが設けられてなる屈折率分布形状を有することを特徴とする分散シフト光ファイバ。

【請求項10】 請求項9に記載の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_{11} 、周辺コア部の半径を r_{12} 、クラッドを基準にしたときの中心コア部の比屈折率差を Δ_{11} 、周辺コア部の比屈折率差を Δ_{12} としたとき、 $1.3 \leq r_{12}/r_{11} \leq 2.5$ 、 $\Delta_{11} \leq 0.3\%$ 、 $\Delta_{12} \geq 0.5\%$ 、 $(\Delta_{12} - \Delta_{11}) \leq 1.2\%$ 、 $0.9 \leq \Delta_{12} \times r_{12}/r_{11} \leq 1.7$ であることを特徴とする分散シフト光ファイバ。

【請求項11】 請求項9に記載の分散シフト光ファイバにおいて、 A_{eff} が70～100 μm^2 、分散スロープが0.07ps/km/nm²以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバ。

【請求項12】 請求項11に記載の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_{11} 、周辺コア部の半径を r_{12} 、クラッドを基準にしたときの中心コア部の比屈折率差を Δ_{11} 、周辺コア部の比屈折率差を Δ_{12} としたとき、 $1.3 \leq r_{12}/r_{11} \leq 2.5$ 、 $\Delta_{11} \leq 0.3\%$ 、 $\Delta_{12} \geq 0.5\%$ 、 $(\Delta_{12} - \Delta_{11}) \leq 1.2\%$ 、 $0.9 \leq \Delta_{12} \times r_{12}/r_{11} \leq 1.7$ であり、かつ、 $\Delta_{11} = a \times \Delta_{12} + b$ としたとき、

a が r_{12}/r_{11} の関数 $c \times (r_{12}/r_{11} - 1)$ で表され、 c が1.5～2.0であり、
 b が r_{12}/r_{11} の関数 $0.4 \times (r_{12}/r_{11}) + e$ で表され、 e が0～0.4であることを特徴とする分散シフト光ファイバ。

【請求項13】 請求項9に記載の分散シフト光ファイバにおいて、 A_{eff} が90～150 μm^2 、分散スロープが0.08ps/km/nm²以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバ。

【請求項14】 請求項13に記載の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_{11} 、周辺コア部の半径を r_{12} 、クラッドを基準にしたときの中心コア部の比屈折率差を Δ_{11} 、周辺コア部の比屈折率差を Δ_{12} としたとき、

$1.3 \leq r_{12}/r_{11} \leq 2.5$ 、 $\Delta_{11} \leq 0.15$

%, $\Delta 12 \geq 0.5\%$, $(\Delta 12 - \Delta 11) \leq 1.2\%$, $1.0 \leq \Delta 12 \times r12 / r11 \leq 1.5$ であることを特徴とする分散シフト光ファイバ。

【請求項15】 請求項1～14のいずれか一項に記載の分散シフト光ファイバと、その波長分散を補償する分散補償光ファイバ、あるいは波長分散および分散スロープを補償する分散スロープ補償分散補償光ファイバとを組み合わせ用いたことを特徴とする光通信システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は分散シフト光ファイバに関し、光ファイバを1種あるいは2種以上用いた光通信システムの伝送路として単品、若しくは分散補償光ファイバなどと組み合わせ用いることができ、さらにこのような光通信システムにおいて、ハイパワー信号光を伝送したり、波長多重伝送を行うのに適したものである。

【0002】

【従来の技術】石英系光ファイバにおける最も低損失な波長は1.55 μm 付近であり、従来から長距離伝送用としてこの波長帯が用いられている。この場合の伝送路（光ファイバ）としては、一般に1.55 μm 帯での波長分散値の絶対値が小さくなるように設計された分散シフトファイバ（DSF）が使用されている。また、近年の光通信のさらなる大容量化の要求にともない、信号波長を多重（WDM）化し、EDFA（エルビウム添加光ファイバ増幅器）などの光増幅器を利用したハイパワー信号光を用いた光通信システムが登場している。この場合、ファイバ中を伝送する光パワー強度が大きいため、非線形光学効果による伝送劣化が無視できない。また、従来の光通信システムでは、1530～1570 nm付近の波長帯が用いられて来たが、最近では、さらに波長多重伝送システムにおいて伝送容量を拡大する検討が進められている。例えば1570～1625 nmの範囲におけるデバイスの開発などが行われ、また1490～1530 nmなどの波長帯の検討結果も報告され始めている。現在実用、または検討されているこれらの波長帯は、一般に1490～1530 nm帯がS-band、1530～1570 nm帯がC-band、1570～1630 nm帯がL-bandと呼ばれている。実際は、光通信システムの使用波長帯は1490～1625 nmの範囲から適宜選択されている。

【0003】伝送路の非線形光学効果は、 n_2 / A_{eff} で表される非線形定数によって評価される。 n_2 は非線形屈折率、 A_{eff} は有効コア断面積である。非線形光学効果を低減するためには、非線形定数 n_2 / A_{eff} を小さくする必要がある。 n_2 は材料を決定すると大きく変化しないため、従来、一般には A_{eff} を拡大して非線形定数を小さくする試みがなされてきた。

【0004】本出願人は、例えば、特開平10-626

40号公報、特開平10-293225号公報などにおいて、長距離システムや波長多重伝送に適した分散シフト光ファイバとして、従来の分散シフトファイバと比べて A_{eff} を大幅に拡大したものを提案した。また、特開平11-119045号公報においては、 A_{eff} の拡大を抑え、分散スロープの低減を優先した分散シフト光ファイバを提案した。分散スロープとは、波長分散値の波長依存性を示すもので、横軸に波長、縦軸に波長分散値をとってプロットした際の曲線の勾配である。波長多重伝送において、伝送路の分散スロープが大きいと、各波長間の波長分散値の差が大きくなり、伝送状態がばらついて全体の伝送特性が劣化する。また、波長分散値がゼロであると、非線形光学効果のひとつである4光子混合が発生しやすくなるため、絶対値は小さいがゼロではない波長分散値が設定された、いわゆるNZDSF（ノンゼロ分散シフト光ファイバ）も提案されている。

【0005】図5（a）～図5（c）は、従来提案されている分散シフト光ファイバあるいはNZDSFに用いられている屈折率分布形状（屈折率プロファイル）の例を示したものである。図5（a）はデュアルシェイプコア型（階段型）の屈折率分布形状の一例を示したもので、符号1は中心コア部であり、その外周上に、この中心コア部1よりも低屈折率の階段コア部2が設けられてコア4が形成されている。そして、このコア4の外周上に、前記階段コア部2よりも低屈折率のクラッド7が設けられている。

【0006】図5（b）は、セグメントコア型の屈折率分布形状の一例を示したもので、高屈折率の中心コア部21の外周上に低屈折率の中間部22が設けられ、この中間部22の外周上に、この中間部22よりも高屈折率で、かつ前記中心コア部21よりも低屈折率のリングコア部23が設けられてコア24が構成されている。さらにこのリングコア部23の外周上に、前記中間部22よりも低屈折率の第1クラッド25が設けられ、この第1クラッド25の外周上に、この第1クラッド25よりも高屈折率で、かつ前記中間部22よりも低屈折率の第2クラッド26が設けられてクラッド27が構成されている。図5（c）は、リング型（凹型）の屈折率分布形状の一例を示したもので、中心の低屈折率の中心コア部31の外周上に高屈折率の周辺コア部32が設けられて2層構造のコア34が構成されている。そして、このコア34の外周上に、前記周辺コア部32よりも低屈折率のクラッド37が設けられることにより、クラッド37を含めて3層構造の屈折率分布形状が構成されている。

【0007】これらの屈折率分布形状を有する従来の分散シフト光ファイバなどは、使用波長帯における波長分散値が小さく、伝送速度や長距離伝送時の累積分散（伝送によって蓄積される波長分散）の観点から、システム設計上有利である。また、波長分散値を負の値に設定し

10

20

30

40

50

た場合は、一般的な1.3 μm 用シングルモード光ファイバ(1.3 SMF)と組み合わせて、比較的簡単に波長分散値を補償するシステムを構築することができる。すなわち、1.3 μm 用シングルモード光ファイバは、波長分散値がゼロになるゼロ分散波長が1.3 μm 付近にあるもので、従来多用されている。そして、1.55 μm 帯においては、波長分散値として比較的大きな正の値(例えば、約17 ps/km/nm弱程度)を有する。そこで、負の波長分散値を有する分散シフト光ファイバの出射側に1.3 μm 用シングルモード光ファイバを接続し、分散シフト光ファイバを伝搬することによって蓄積された負の波長分散を、1.3 μm 用シングルモード光ファイバの正の波長分散で補償することによって、システム全体の波長分散を小さくすることができる。

【0008】しかし、従来提案されている分散シフト光ファイバなどは、一般的な伝送路として用いるため、小さな波長分散が要求されている。例えば1550 nm付近における波長分散値の絶対値を6 ps/km/nm以下にしたものなどが多く、このように波長分散値の絶対値を小さく設定すると、Aeffの拡大と分散スロープの低減の両立が困難であるという問題があった。例えば、Aeffを十分に拡大しようすると分散スロープを十分に小さくすることができず、分散スロープを十分に小さくしようするとAeffを十分に大きくすることができなかった。

【0009】一方、最近では、このような低波長分散の分散シフト光ファイバを用いたシステムとは別に、例えば特開平6-11620号公報に開示されているように、分散補償光ファイバ(以下、DCFと略記する)を用いたシステムが提案されている。これは、伝送路の大部分に、使用波長帯の波長分散値が比較的大きな伝送用光ファイバを用い、この伝送路の出射側に、比較的短い長さのDCFを接続して構成したものである。このDCFは、伝送用光ファイバの波長分散値と異なる符号の波長分散値を有し、かつこの波長分散値の絶対値が、前記伝送用光ファイバの波長分散値の絶対値よりかなり大きいものが選択される。その結果、例えば数km以上の伝送用光ファイバで生じた波長分散を、出射側の短いDCFにて補償し、システム全体の波長分散値を小さくすることができる。

【0010】具体的には、例えば伝送用光ファイバの波長分散値が正の値である場合は、その出射側に、絶対値が大きい負の波長分散値を有するDCFを接続する。また、波長分散だけでなく、伝送用光ファイバの分散スロープと異なる符号の分散スロープを有し、波長分散と分散スロープとを同時に補償する、いわゆる分散スロープ補償分散補償光ファイバ(以下、SCDCFと略記する。)が提案され、DCFと同様の用途に用いられている。SCDCFは特に波長多重伝送を行う場合に好適で

ある。この伝送用光ファイバとSCDCFとを組み合わせた伝送路においては、局所的な波長分散値が大きくなるため、4光子混合の発生を効果的に抑制することができる。また、光通信システム全体ではほぼ平坦な波長分散値が得られるため、伝送損失の観点において非常に有利であり、現在積極的に開発が行われている。

【0011】現在、このようにDCFまたはSCDCFを用いたシステムの伝送用光ファイバとしては、一般に、1.3 μm 用シングルモード光ファイバが用いられている。図5(d)は、1.3 μm 用シングルモード光ファイバの一般的な屈折率分布形状を示したもので、一層構造のコア44の外周上に、このコア44よりも低屈折率の一層構造のクラッド47が設けられて、単峰型の屈折率分布形状が構成されている。

【0012】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、一般的な1.3 μm 用シングルモード光ファイバを1.55 μm 帯に使用すると、Aeffは80 μm^2 前後、分散スロープは0.06 ps/nm²/km前後の値が得られるが、上述のように波長分散値は17 ps/km/nm程度であり、かなり大きい。そのため、光信号の伝搬に伴って累積する波長分散値による影響の為に、伝送距離が制約されるという問題があった。また、DCFやSCDCFは、伝送損失が一般的な1.3 μm 用シングルモード光ファイバと比較して大きく、かつAeffが小さいため、非線形光学効果が大きい。よって、その使用長さの増加によってシステム全体の伝送特性が劣化するという問題があった。

【0013】また、1.3 μm 用シングルモード光ファイバに用いられる単峰型の屈折率分布形状においても、コア径、クラッドとコアとの比屈折率差などの構造パラメータを調整することなどによって、波長分散値を小さくすることができる。しかしながら、伝送路として必要な曲げ損失特性を維持できる範囲で波長分散値を小さくすると、Aeffが非常に小さくなるため、非線形光学効果が大きくなり、上述のようなハイパワー信号光を用いた光通信システムに適用することが困難となる。

【0014】本発明は前記事情に鑑みてなされたもので、光ファイバを1種あるいは2種以上用いた光通信システムにおいては、低コスト化と伝送特性の一方あるいは両方を実現できる技術を提供することを課題とする。具体的には、例えば上述のように従来のNZDSFのAeffの拡大と分散スロープの低減の両立が困難であるという問題を解決し、その4光子混合が発生しにくいという利点を生かすとともに、Aeffの拡大による非線形光学効果の抑制によって伝送特性を向上させることができ、分散スロープの低減によって波長多重伝送において伝送特性の向上を図ることができる分散シフト光ファイバを提供することを課題とする。また、従来、DCF、SCDCFを用いた光通信システムに用いられていた

1. 3 μm 用シングルモード光ファイバにかわる伝送用光ファイバとして好適な分散シフト光ファイバであって、波長分散値の絶対値が1. 3 μm 用シングルモード光ファイバよりも小さく、短いDCFやSCDCFによって波長分散を補償できるものを提供することを課題とする。さらに、これと同時に大きなAeffを有することにより、伝送用光ファイバ自体の非線形光学効果を抑制でき、かつ小さな分散スロープを有することにより、波長多重伝送に適した分散シフト光ファイバを提供することを目的とする。さらには、できるだけ簡単な構造で、低コストで製造できる分散シフト光ファイバを提供することを目的とする。

【0015】

【課題を解決するための手段】本発明においては、上述した従来の分散シフト光ファイバあるいはNZDSFに用いられているデュアルシェイブコア型、またはリング型の屈折率分布形状を用いる。これらの屈折率分布形状を有するものは、上述のように、従来、1550nm帯において、波長分散値をゼロに近い値に設定することに主眼をおいて検討されてきた。しかしながら、本発明者らは、従来のNZDSFよりも波長分散値を大きくとることによってもたらされる4光子混合の抑制という効果、およびそれによりもたらされるAeffの拡大と分散スロープの低減の両立という現象が波長多重システムにおいて有効であると考えた。また、一方でDCFやSCDCFと組み合わせて1. 55 μm 帯の波長多重システムに用いられている1. 3 μm 用シングルモード光ファイバよりも小さな波長分散値を設定した光ファイバが実現できれば、より高速、長距離伝送に適したシステムを組むことができるようになると考えた。また、このような光ファイバにおいては、1. 3 μm 用シングルモード光ファイバよりもAeffを大きくすることができれば、1. 3 μm 用シングルモード光ファイバを用いた場合よりも非線形光学効果を小さくすることができると考えた。そこで、本発明者らは、具体的には従来のNZDSFと比べて波長分散値を大きく、かつ1. 3 μm 用シングルモード光ファイバよりも小さく設定することにより、従来の波長多重伝送用の光ファイバでは得られなかった大きなAeffと小さな分散スロープを得ることを目的として検討を行った。

【0016】そして、本発明者らは、上述の屈折率分布形状において、波長分散値を波長分散値を7~15 ps/km/nmとすることにより、以下の1)、2)のいずれかの分散シフト光ファイバを得ることができることを見出した。

1) Aeffの拡大と分散スロープの低減の両立を図ることができるNZDSF。

2) 一般的な1. 3 μm 用シングルモード光ファイバよりもAeffを拡大した分散シフト光ファイバ。

前記1)の場合は従来のNZDSFでは実現できなかった

たAeffの拡大と分散スロープの低減を両立することができる。また、この分散シフト光ファイバにおいては、零分散波長が1490nmよりも短い波長に移行する。そのため、C-Band、L-Bandのみならず、S-Bandにおける波長多重伝送も可能となり、従来のNZDSFでは得られなかった大きな効果を得ることができる。前記2)の場合は、DCFもしくはSCDCFと組み合わせた伝送路として特に有効である。そして、一般的な1. 3 μm 用シングルモード光ファイバよりも小さな波長分散値をもつため、高速伝送システムに有効である。また、Aeffが拡大されているため、非線形効果を低減することができるため、海底システムのような超長距離伝送系に有効である。また、いずれ場合も分散スロープは0. 09 ps/km/nm²以下、設計によっては0. 07 ps/km/nm²以下に設定することができる。したがって、波長に対して波長分散値のばらつきが小さく、波長多重伝送システムに好適である。

【0017】具体的には以下のような解決手段を提案する。第1の発明は、1490~1625nmから選択される使用波長帯において、波長分散値が7~15 ps/km/nm、Aeffが60~150 μm^2 、分散スロープが0. 09 ps/km/nm²以下、曲げ損失が100 dB/m以下であり、かつ実質的にシングルモード伝搬となるカットオフ波長を有することを特徴とする分散シフト光ファイバである。第2の発明は、第1の発明の分散シフト光ファイバにおいて、高屈折率の中心コア部と、その外周上に設けられた、該中心コア部よりも低屈折率の階段コア部と、該階段コア部の外周上に設けられた、該階段コア部よりも低屈折率のクラッドとからなる屈折率分布形状を有することを特徴とする分散シフト光ファイバである。第3の発明は、第2の発明の分散シフト光ファイバにおいて、Aeffが60~110 μm^2 、分散スロープが0. 08 ps/km/nm²以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第4の発明は、第3の発明の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径をr1、階段コア部の半径をr2、クラッドを基準としたときの中心コア部の比屈折率差を $\Delta 1$ 、階段コア部の比屈折率差を $\Delta 2$ としたとき、 $\Delta 1$ が0. 25~0. 55%、r2/r1が1. 5~5. 0、 $\Delta 2/\Delta 1$ が0. 025以上であって、かつ $0. 06 \times (r2/r1) + 0. 5$ で求められる値以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第5の発明は、第3の発明の分散シフト光ファイバにおいて、波長分散値が7~11 ps/km/nm、Aeffが60~80 μm^2 、分散スロープが0. 07 ps/km/nm²以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第6の発明は、第5の発明の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径をr1、階段コア部の半径をr2、クラッドを基準としたときの中心

コア部の比屈折率差を $\Delta 1$ 、階段コア部の比屈折率差を $\Delta 2$ としたとき、 $\Delta 1$ が $0.4 \sim 0.5\%$ 、 r_2/r_1 が $3.5 \sim 5.0$ 、 $\Delta 2/\Delta 1$ が 0.025 以上であって、かつ $-0.06 \times (r_2/r_2) + 0.5$ で求められる値以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第7の発明は、第3の発明の分散シフト光ファイバにおいて、波長分散値が $12 \sim 15 \text{ ps/nm/km}$ 、 A_{eff} が $90 \sim 110 \mu\text{m}^2$ 、分散スロープが 0.08 ps/km/nm^2 以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第8の発明は、第7の発明の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_1 、階段コア部の半径を r_2 、クラッドを基準にしたときの中心コア部の比屈折率差を $\Delta 1$ 、階段コア部の比屈折率差を $\Delta 2$ としたとき、 $\Delta 1$ が $0.4 \sim 0.5\%$ 、 r_2/r_1 が $2.0 \sim 4.0$ 、 $\Delta 2/\Delta 1$ が 0.025 以上であって、かつ $-0.06 \times (r_2/r_2) + 0.5$ で求められる値以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第9の発明は、第1の発明の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の外周上に、該中心コア部よりも高屈折率の周辺コア部が設けられ、該周辺コア部の外周上に、該周辺コア部よりも低屈折率のクラッドが設けられてなる屈折率分布形状を有することを特徴とする分散シフト光ファイバである。第10の発明は、第9の発明の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_{11} 、周辺コア部の半径を r_{12} 、クラッドを基準にしたときの中心コア部の比屈折率差を $\Delta 11$ 、周辺コア部の比屈折率差を $\Delta 12$ としたとき、 $1.3 \leq r_{12}/r_{11} \leq 2.5$ 、 $\Delta 11 \leq 0.3\%$ 、 $\Delta 12 \geq 0.5\%$ 、 $(\Delta 12 - \Delta 11) \leq 1.2\%$ 、 $0.9 \leq \Delta 12 \times r_{12}/r_{11} \leq 1.7$ であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第11の発明は、第9の発明の分散シフト光ファイバにおいて、 A_{eff} が $70 \sim 100 \mu\text{m}^2$ 、分散スロープが 0.07 ps/km/nm^2 以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第12の発明は、第11の発明の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_{11} 、周辺コア部の半径を r_{12} 、クラッドを基準にしたときの中心コア部の比屈折率差を $\Delta 11$ 、周辺コア部の比屈折率差を $\Delta 12$ としたとき、 $1.3 \leq r_{12}/r_{11} \leq 2.5$ 、 $\Delta 11 \leq 0.3\%$ 、 $\Delta 12 \geq 0.5\%$ 、 $(\Delta 12 - \Delta 11) \leq 1.2\%$ 、 $0.9 \leq \Delta 12 \times r_{12}/r_{11} \leq 1.7$ であり、かつ、 $\Delta 11 = a \times \Delta 2 + b$ としたとき、 a が r_{12}/r_{11} の関数 $c \times (r_{12}/r_{11} - 1)$ で表され、 c が $1.5 \sim 2.0$ であり、 b が r_{12}/r_{11} の関数 $0.4 \times (r_{12}/r_{11}) + e$ で表され、 e が $0 \sim 0.4$ であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第13の発明は、第9の発明の分散シフト光ファイバにおいて、 A_{eff} が $90 \sim 150 \mu\text{m}^2$ 、分散スロープが 0.08 ps/km/nm^2 以下であることを特徴とする分散シフ

ト光ファイバである。第14の発明は、第13の発明の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_{11} 、周辺コア部の半径を r_{12} 、クラッドを基準にしたときの中心コア部の比屈折率差を $\Delta 11$ 、周辺コア部の比屈折率差を $\Delta 12$ としたとき、 $1.3 \leq r_{12}/r_{11} \leq 2.5$ 、 $\Delta 11 \leq 0.15\%$ 、 $\Delta 12 \geq 0.5\%$ 、 $(\Delta 12 - \Delta 11) \leq 1.2\%$ 、 $1.0 \leq \Delta 12 \times r_{12}/r_{11} \leq 1.5$ であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第15の発明は、第1～14の発明のいずれの分散シフト光ファイバと、その波長分散を補償する分散補償光ファイバ、あるいは波長分散および分散スロープを補償する分散スロープ補償分散補償光ファイバとを組み合わせ用いたことを特徴とする光通信システムである。

【0018】

【発明の実施の形態】この分散シフト光ファイバの使用波長帯は、 $1490 \sim 1625 \text{ nm}$ の範囲から適度な波長幅の波長帯が選択される。特に限定するものではないが、例えば $1530 \sim 1570 \text{ nm}$ のC-Bandや、 $1530 \sim 1600 \text{ nm}$ のようにL-Bandの一部の含む波長帯などを選択することができる。

【0019】使用波長帯における波長分散値は $7 \sim 15 \text{ ps/km/nm}$ とされる。 $7 \sim 12 \text{ ps/km/nm}$ の範囲においては、従来のNZDSFよりも良好な特性を得ることができる。すなわち、従来のNZDSFよりも波長分散値を大きく設定することにより、4光子混合がさらに発生しにくくなり、また、 A_{eff} の拡大と分散スロープの低減の両立を図ることが可能となり、非常に有利である。また、 $12 \sim 15 \text{ ps/km/nm}$ の範囲においては、 $1.3 \mu\text{m}$ 用シングルモード光ファイバよりも良好な特性を得ることができる。すなわち、一般的な $1.3 \mu\text{m}$ 用シングルモード光ファイバよりも波長分散値を小さくすることにより、伝送速度や長距離伝送時の累積分散の観点から、システム設計上有利である。また、 A_{eff} を拡大することができ、非線形光学効果抑制の観点からも有利である。

【0020】 A_{eff} は以下の式から求められるものである。

【0021】

【数1】

$$A_{\text{eff}} = \frac{2\pi \left\{ \int_0^a |E(a)|^2 da \right\}^2}{\int_0^a |E(a)|^4 da}$$

a : コアの半径

$E(a)$: 半径 a での電界強度

【0022】この分散シフト光ファイバにおいて、使用波長帯における A_{eff} は $60 \sim 150 \mu\text{m}^2$ とされ、 $150 \mu\text{m}^2$ をこえるとカットオフ波長が長くな

り、シングルモード伝搬を保証できなくなる場合がある。60 μm^2 未満の場合は一般的な単峰型の屈折率分布形状を備えた光ファイバと同等以上の性能を実現できない。好ましくはこの数値範囲の下限値が65 μm^2 、さらに好ましくは70 μm^2 に設定すると、非線形光学効果の低減の観点において、一般的な単峰型の屈折率分布形状を備えた光ファイバよりも有利な特性を得ることができる。

【0023】使用波長帯における分散スロープは、上述のように小さい程好ましく、この例において、使用波長帯における分散スロープは0.09 $\text{ps}/\text{km}/\text{nm}^2$ 以下、好ましくは0.08 $\text{ps}/\text{km}/\text{nm}^2$ 以下、さらに好ましくは0.07 $\text{ps}/\text{km}/\text{nm}^2$ 以下という小さい値を実現することができる。0.09 $\text{ps}/\text{km}/\text{nm}^2$ をこえたと一般的な1.55 μm 分散シフト光ファイバを用いた場合と同程度以上の特性を得ることができない場合がある。

【0024】曲げ損失は、使用波長帯において曲げ直径(2R)が20mmの条件の値をいうものとする。曲げ損失は小さい程好ましく、本発明において、曲げ損失は100 dB/m 以下、好ましくは40 dB/m 以下とされる。実質的には0.1 dB/m 以上の値が得られる。100 dB/m をこえたと、分散シフト光ファイバに加えられる僅かな曲がりなどによって損失が発生しやすく、敷設時や取り扱い時に余分な損失を生じやすくなるため不都合である。

【0025】また、本発明の分散シフト光ファイバはシングルモード光ファイバであるため、使用波長帯において、実質的にシングルモード伝搬を保証するカットオフ波長を有する必要がある。通常のカットオフ波長は、C C I T Tの2m法(以下2m法と記す)による値によって規定されている。しかし、実際の長尺の使用状態においては、この値が使用波長帯の下限値よりも長波長側であってもシングルモード伝搬が可能である。

【0026】したがって、本発明の分散シフト光ファイバにおいて、2m法で規定されるカットオフ波長は、分散シフト光ファイバの使用長さと使用波長帯によってシングルモード伝搬可能であるように設定する。具体的には、例えば2m法におけるカットオフ波長が1.8 μm であっても、5000m程度以上の長尺の状態であれば、上述の使用波長帯におけるシングルモード伝搬を実現することができる。

【0027】本発明の分散シフト光ファイバの屈折率分布形状はデュアルシェイブコア型とリング型の2種類を用いることができる。以下、屈折率分布形状ごとに説明する。

1. 第1の例(デュアルシェイブコア型)

図1は本発明の分散シフト光ファイバの第1の例として、デュアルシェイブコア型の屈折率分布形状の一例を示したものである。この屈折率分布形状は、中心コア部

1の外周上に階段コア部2が設けられてなるコア4と、その外周上に設けられた一律の屈折率を有する一層構造のクラッド7とから構成されている。前記中心コア部1は最も高い屈折率を備えている。前記階段コア部2はこの中心コア部1よりも低屈折率であり、また、クラッド7はこの階段コア部2よりも低屈折率である。図中符号r1、r2は、それぞれ、中心コア部1と階段コア部2の半径を示し、 $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ は、それぞれ、クラッド7の屈折率を基準にしたときの中心コア部1の比屈折率差と階段コア部2の比屈折率差を示している。

【0028】この例において、例えば中心コア部1と階段コア部2は屈折率を上昇させる作用を有するゲルマニウムを添加したゲルマニウム添加石英ガラス、クラッド7は純石英ガラスから構成されている。また、実際の分散シフト光ファイバの屈折率分布形状においては、図1に示したように各層(中心コア部1、階段コア部2、クラッド7)の境界が明確ではなく、丸みを帯びた、いわゆるだれを生じた状態となる場合などが多いが、実効的に本発明の分散シフト光ファイバとしての特性を得ることができれば特に問題はない。

【0029】なお、この第1の例の分散シフト光ファイバにおいては、Aeffは、60~110 μm^2 の範囲とされる。この範囲に設定することにより、非線形光学効果を抑制することができる。また、この第1の例の分散シフト光ファイバにおいては比較的容易に分散スロープを0.08 $\text{ps}/\text{km}/\text{nm}^2$ 以下、好ましくは0.07 $\text{ps}/\text{km}/\text{nm}^2$ 以下とすることができる。

【0030】本発明の分散シフト光ファイバとしての特性を満足するために、第1の例の分散シフト光ファイバにおいては、 $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ 、r1、r2という4つの構造パラメータを、以下の関係を満足するように設計すると好ましい。 $\Delta 1$ は0.25~0.55%とされる。0.25%よりも小さいと、曲げ損失が大きくなるため実用的ではない。また、所望の波長分散値(15 $\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$)以下に抑えることが困難となる。一方、0.55%よりも大きいと、Aeffを十分に拡大することが困難となる。また、r2/r1(階段倍率)は1.5~5.0、好ましくは2.0~5.0とされる。1.5よりも小さいと、従来の単峰型の屈折率分布形状を有する1.3 μm 用シングルモード光ファイバと同程度の特性しか得ることができない。また、5.0をこえたと、カットオフ波長が長くなり、シングルモード伝搬を保証することが困難となる場合がある。

【0031】また、 $\Delta 2$ は、r2/r1との関係によって、かなり広い範囲が許容される。r2/r1が小さい場合は $\Delta 2$ の値を大きくする必要があり、r2/r1が大きい場合は $\Delta 2$ を小さくする必要がある。そしてさらに、上述の特性を満足するためには、 $\Delta 2/\Delta 1$ が以下の関係を満足すと好ましい。

$$0.025 \leq \Delta 2/\Delta 1 \leq -0.06 \times (r2/r1)$$

+0.5

$\Delta 2/\Delta 1$ が0.025よりも小さい場合は曲げ損失を十分に小さくすることができない。 $-0.06 \times (r2/r1) + 0.5$ の値よりも大きい場合はカットオフ波長が長くなる。そして、これらの数値範囲から、上述の特性を満たす $r1$ 、 $r2$ 、 $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ の4つの構造パラメータの組み合わせを選択する。

【0032】なお、この分散シフト光ファイバにおいて、 $r2$ 、すなわちコアの半径は特に限定することはないが、通常5~25 μm の範囲となる。また、クラッド7（分散シフト光ファイバ）の外径は、通常約125 μm とされる。

【0033】また、この第1の例の分散シフト光ファイバは、上述のように波長分散値によって主に従来のNZDSFよりも良好な特性を得ることができるものと、主に1.3 μm 用シングルモード光ファイバよりも良好な特性を図ることができるものの二つに大別することができる。以下それぞれについて説明する。

1.1 Aeffの拡大と分散スロープの低減を両立したNZDSF

この場合は、波長分散値を7~11ps/km/nmの範囲に設定する。従来のNZDSFの一般的な波長分散値(6ps/km/nm以下)よりも大きくすることにより、Aeffの拡大と分散スロープの低減を両立することができる。なお、このように波長分散値を正分散側にシフトさせることは、4光子混合抑制の観点において有利である。また、この程度の波長分散値であれば、中継距離によっては問題にならない程度の累積分散が得られ、また、より長距離のシステムにおいては、適切なDCFやSCDCFと組み合わせることにより、残留分散を抑制したシステムを構築することができる。すなわち、この分散シフト光ファイバにおいては、Aeffを60~80 μm^2 、分散スロープを0.07ps/km/nm以下とすることができる。その結果、非線形光

学効果を従来のNZDSFと同等以上に抑制することができ、かつ波長多重伝送に適したものを提供することができる。また、シングルモード伝搬を保證できるカットオフ波長の設定がさらに容易となる。この分散シフト光ファイバにおいては、 $\Delta 1$ を0.4~0.5%、 $r2/r1$ を3.5~5.0、 $\Delta 2/\Delta 1$ を0.025以上であって、かつ $-0.06 \times (r2/r2) + 0.5$ で求められる値以下とすることにより、好ましい特性を実現することができる。

10 【0034】1.2 一般的な1.3 μm 用シングルモード光ファイバよりもAeffを拡大した分散シフト光ファイバ。

この場合は波長分散値を12~15ps/nm/kmに設定する。その結果、Aeffを90~110 μm^2 、分散スロープを0.08ps/km/nm以下とすることができる。一般的な1.3 μm 用シングルモード光ファイバよりも非線形光学効果を抑制することができ、かつ波長多重伝送に適した分散シフト光ファイバを提供することができる。この分散シフト光ファイバにおいては、 $\Delta 1$ を0.4~0.5%、 $r2/r1$ を2.0~4.0、 $\Delta 2/\Delta 1$ を0.025以上であって、かつ $-0.06 \times (r2/r2) + 0.5$ で求められる値以下とすることにより、好ましい特性を実現することができる。

20 【0035】表1は、このような条件を満足する分散シフト光ファイバの具体的な設計例の構造パラメータと特性値を示したシミュレーション結果である。なお、測定波長は1550nmである。表中、 λc はカットオフ波長、MFDはモードフィールド径である。いずれも上述のAeff、分散スロープ、波長分散値、曲げ損失、カ
30 ャットオフ波長の好ましい数値範囲を満足した特性が得られている。

【0036】

【表1】

番号	$\Delta 1$ [%]	$\Delta 2$ [%]	$r2/r1$	$r2$ [μm]	カットオフ 波長 [μm]	A_{eff} at 1550nm [μm^2]	MFD at 1550nm [μm]	波長分散値 at 1550nm [ps/km/nm]	分散スロープ at 1550nm [ps/km/nm ²]	曲げ損失 at 20 ϕ 1550nm [dB/m]
1	0.50	0.07	5.0	14.23	1.43	63.41	9.25	8.50	0.061	6.1
2	0.48	0.07	5.0	14.93	1.48	65.81	9.41	9.63	0.060	5.9
3	0.45	0.07	5.0	15.15	1.51	70.52	9.75	10.22	0.061	11.9
4	0.45	0.07	3.5	9.86	1.20	71.32	9.82	10.15	0.067	17.4
5	0.45	0.08	4.0	11.57	1.39	73.70	9.98	9.97	0.067	12.6
6	0.45	0.08	3.5	11.28	1.43	70.28	9.72	11.85	0.063	2.5
7	0.45	0.09	3.5	11.22	1.51	72.31	9.86	11.93	0.064	2.3
8	0.45	0.10	3.5	11.10	1.57	74.55	10.02	12.21	0.065	2.1
9	0.40	0.03	3.0	10.74	1.21	70.63	9.68	14.23	0.060	5.7
10	0.40	0.05	5.0	18.39	1.41	74.99	9.98	14.12	0.059	7.4
11	0.40	0.11	2.0	5.88	1.14	75.64	10.12	13.95	0.064	19.9
12	0.40	0.07	4.0	14.76	1.57	79.13	10.27	13.87	0.060	4.8
13	0.40	0.09	2.5	8.05	1.27	79.20	10.33	14.13	0.066	9.7
14	0.40	0.11	3.0	9.82	1.52	87.66	10.88	14.25	0.068	7.1
15	0.40	0.13	2.8	8.74	1.49	92.42	11.18	14.89	0.069	8.4
16	0.45	0.17	3.5	8.81	1.68	101.45	11.67	14.80	0.074	6.7

【0037】2. 第2の例（リング型）

図2は本発明の分散シフト光ファイバの第2の例として、リング型の屈折率分布形状の一例を示したものである。この屈折率分布形状においては、中心の低屈折率の中心コア部31の外周上に高屈折率の周辺コア部32が設けられて2層構造のコア34が構成されている。そして、このコア34の外周上に、前記周辺コア部32よりも低屈折率のクラッド37が設けられることにより、クラッド37を含めて3層構造の凹型の屈折率分布形状が構成されている。

【0038】この例において、例えば中心コア部31は屈折率を下降させる作用を有するフッ素を添加したフッ素添加石英ガラス、周辺コア部32はゲルマニウム添加石英ガラス、クラッド37は純石英ガラスから構成されている。なお、実効的に本発明の分散シフト光ファイバとしての特性が得られていれば、図3に示したように、各層（中心コア部31、周辺コア部32、クラッド37）の境界が明確ではなく、丸みを帯びた、いわゆるだれを生じた状態、あるいは周辺コア部32の屈折率分布が階段状に増加、あるいは減少する状態など、多少変形したものでよいことは、第1の例と同様である。

【0039】図4は、リング型の屈折率分布形状を有する光ファイバと、単峰型の屈折率分布形状の光ファイバにおいて、構造パラメータを調整することにより、曲げ損失を10dB/mに一定に保った状態で波長分散値を変化させたときの A_{eff} と分散スロープの変化を示したグラフである。このグラフにおいて、 A_{eff} は、リング型の方が大きく、有利であり、分散スロープは単峰型の方が小さく、有利である。また、波長分散値が減少すると（横軸を左から右に移動すると）、単峰型、リング型のそれぞれにおいて、15ps/km/nm付近と10ps/km/nm付近で A_{eff} が急激に減

少している。なお、波長分散値が大きく、 A_{eff} が大きい範囲（単峰型、リング型において、それぞれ15ps/km/nm付近、10ps/km/nm付近よりも波長分散値が大きい範囲）は、曲げ損失、マイクロバンド特性において、実用的な特性が得られず、実際の使用に耐えない。分散スロープは波長分散値の変化にほとんど左右されず、屈折率分布形状によってほぼ決定される。

【0040】ここで、波長分散値が10ps/km/nmの場合の A_{eff} と分散スロープについて考察すると、リング型の A_{eff} は、単峰型の A_{eff} が約58 μm^2 であるのに対して78 μm^2 であり、かなり大きい。一方、単峰型の分散スロープが約0.058ps/km/nm²であるのに対して、リング型の分散スロープは0.068ps/km/nm²であり、やや大きい。このとき、リング型は、単峰型に対して A_{eff} が約35%大きく、分散スロープが約17%大きい。よって、リング型と単峰型との間における、 A_{eff} と分散スロープの増加率には大きな差がある。そして、分散スロープがやや大きくなるものの、 A_{eff} の増加率が大きいため、単峰型よりもリング型の方が、波長分散値の低減、 A_{eff} の拡大、分散スロープの低減という伝送路としての好ましい特性を満足するには、総合的に有利である。

【0041】また、 A_{eff} が80 μm^2 の場合の分散スロープと波長分散値について考察すると、単峰型に対するリング型の分散スロープの増加率は約17%である。一方、単峰型の波長分散値に対してリング型の波長分散値は、約35%小さくなっている。よって、リング型は、単峰型と比較して、分散スロープがやや大きくなるものの、波長分散値の低減効果が大きいため、この場合も単峰型よりもリング型の方が、伝送路とし

て、総合的に有利である。よって、上述のように、分散スロープのみに着目すれば、単峰型の方が小さく、有利であるが、Oリング型においては、Aeffの拡大効果と波長分散値の低減効果が大きいので、総合的に、単峰型よりも有利な特性が得られる。

【0042】また、この第2の例の分散シフト光ファイバにおいて、波長分散値、Aeff、分散スロープ、カットオフ波長の好ましい特性を得るためには、 $\Delta 11$ 、 $\Delta 12$ 、 $r11$ 、 $r12$ という4つの構造パラメータを、以下の関係を満足するように設計すると好ましい。 $r12/r11$ は1.3~2.5とされる。この範囲外の場合は従来の単峰型の屈折率分布形状を有する1.3 μm 用シングルモード光ファイバと同程度の特性しか得ることができない。 $\Delta 11$ は0.3%以下とされる。0.3%よりも大きいと、単峰型の屈折率分布形状に近づくため、Aeffを十分に拡大することが困難となる。 $\Delta 12$ は0.5%以上、 $\Delta 12 - \Delta 11$ は1.2%以下とされる。これらの条件を満足しない場合は曲げ損失を上述の範囲に設定することができず、またカットオフ波長が長くなり、使用可能なものが得られない。また、 $0.9 \leq \Delta 12 \times r12 / r11 \leq 1.7$ の関係を満足すると好ましい。この値が0.9未満の場合は曲げ損失もしくはカットオフ波長を使用可能な範囲に設定することができない。1.7をこえるとAeffの拡大が困難である。そして、これらの数値範囲から、上述の特性を満たす $r11$ 、 $r12$ 、 $\Delta 11$ 、 $\Delta 12$ の4つの構造パラメータの組み合わせを選択して、分散シフト光ファイバを設計する。

【0043】なお、この分散シフト光ファイバにおいて、 $r12$ 、すなわちコアの半径は特に限定することはないが、通常2~6 μm の範囲となる。また、クラッド*

*37 (分散シフト光ファイバ)の外径は、通常約125 μm とされる。

【0044】さらに、この第2の例の分散シフト光ファイバにおいて、Aeffが70~100 μm^2 で、かつ分散スロープが0.07 ps/km/nm²以下という特性を得るためには、上述の $r12/r11$ 、 $\Delta 11$ 、 $\Delta 12$ 、 $\Delta 12 - \Delta 11$ 、 $\Delta 12 \times r12 / r11$ の数値範囲を満足するとともに、以下の条件を満足するように設定すると好ましい。 $\Delta 11 = a \times \Delta 2 + b$ としたとき、aが $r12/r11$ の関数 $c \times (r12/r11 - 1)$ で表され、cが1.5~2.0であり、bが $r12/r11$ の関数 $0.4 \times (r12/r11) + e$ で表され、eが0~0.4である。

【0045】さらに、Aeffが90~150 μm^2 で、かつ分散スロープが0.08 ps/km/nm²以下という特性を得るためには、以下の条件を満足するように構造パラメータを設定すると好ましい。

$$1.3 \leq r12 / r11 \leq 2.5$$

$$\Delta 11 \leq 0.15\%$$

$$\Delta 12 \geq 0.5\%$$

$$(\Delta 12 - \Delta 11) \leq 1.2\%$$

$$1.0 \leq \Delta 12 \times r12 / r11 \leq 1.5$$

【0046】表2は、このような条件を満足する第2の例の分散シフト光ファイバの具体的な設計例の構造パラメータと特性値を示したシミュレーション結果である。なお、測定波長は1550 nmである。いずれも上述のAeff、分散スロープ、波長分散値、曲げ損失、カットオフ波長の好ましい数値範囲を満足した特性が得られている。

【0047】

【表2】

番号	$\Delta 1$ [%]	$\Delta 2$ [%]	$r2$ / $r1$	$r2$ [μm]	カットオフ 波長 [μm]	Aeff at 1550nm [μm^2]	MFD at 1550nm [μm]	波長分散値 at 1550nm [ps/km/nm]	分散スロープ at 1550nm [ps/km/nm ²]	曲げ損失 at 20 ϕ 1550nm [dB/m]
1	0.00	0.90	1.5	3.50	1.42	85.5	9.1	7.70	0.074	2.3
2	0.00	0.70	1.8	2.95	1.15	74.5	9.4	8.70	0.065	26.6
3	-0.05	0.95	1.3	4.00	1.42	127.6	10.4	10.80	0.079	68.4
4	-0.05	0.80	1.5	4.00	1.50	106.8	9.6	10.37	0.077	7.8
5	-0.08	0.85	1.6	4.00	1.50	103.5	9.5	10.44	0.076	5.4
6	-0.10	0.60	1.8	4.25	1.49	110.7	10.0	12.43	0.072	11.2
7	-0.05	0.65	1.7	4.00	1.44	103.2	9.9	12.36	0.072	10.3

【0048】第1の例ないし第2の例の分散シフト光ファイバは、CVD法、VAD法などの従来法によって製造することができる。これらの分散シフト光ファイバは比較的簡単な屈折率分布形状を有するため、製造時に制御すべき構造パラメータの数が少なく、製造上有利であり、所望の特性が効率よく得られる。

【0049】

【実施例】以下、実施例により、本発明の効果を具体的に示す。図6、表3は、第1の例の分散シフト光ファイ

バに係る実施例を示したものである。本実施例においては、VAD法を用い、表1に示した試料番号1、5の設計条件に基づいて製造した。その結果、本実施例においては、1490~1625 nmの範囲から選択されたC-bandにおいて、+7~+11 ps/km/nmの波長分散値が得られた。また、このようにC-bandにおいて、従来のNZDSFよりも大きな波長分散値が設定されているため、S-bandにおいての波長多重伝送を行うのに十分な波長分散値が確保できた。また、

分散スロープが小さいため、L-Bandにおける波長分散値も十分に小さく低減されることが確認できた。図7、表4は、第1の例の分散シフト光ファイバに係る他の実施例を示したものである。本実施例においては、VAD法を用い、表1に示した試料番号14、16の設計条件に基づいて製造した。その結果、ほぼ設計通りの特性が得られた。そして、従来の1.3 μ m用シングルモード光ファイバと比べて同等以上のAeffが確保され、上述の範囲から選択された波長帯（本実施例においてはC-band）において、1.3 μ m用シングルモード光ファイバよりも小さな+12~15ps/km/nmの波長分散値が得られた。図8、表5は、第2の例の分散シフト光ファイバの実施例を示したものである。本実施例においては、MCVD法を用い、表2に示した試料番号1の設計条件に基づいて製造した。丸みを帯び*

*た屈折率プロファイルであるが、設計とほぼ同様の特性値を得ることができた。そして、図6、表3に示した実施例と同様に上述の範囲から選択された波長帯（本実施例においてはC-band）において、+7~+11ps/km/nmの波長分散値が得られた。図9、表6は、第2の例の分散シフト光ファイバの他の実施例を示したものである。本実施例においては、MCVD法を用いて表2に示した試料番号4の設計条件に基づいて製造した。その結果、Aeffを1.3 μ m用シングルモード光ファイバよりも30%程度拡大した上で、波長分散値を1.3 μ m用シングルモード光ファイバよりも30%程度低減できることが確認できた。

【0050】

【表3】

試料番号	カットオフ波長 [μ m]	Aeff at 1550nm [μ m ²]	MFD at 1550nm [μ m]	波長分散値 at 1550nm [ps/km/nm]	分散スロープ at 1550nm [ps/km/nm ²]	曲げ損 at 20 ϕ , 1550nm [dB/m]
1(表1)	1.41	65.3	9.39	8.21	0.061	5.2
3(表1)	1.48	72.1	9.86	9.85	0.061	8.5

【0051】

※ ※【表4】

試料番号	カットオフ波長 [μ m]	Aeff at 1550nm [μ m ²]	MFD at 1550nm [μ m]	波長分散値 at 1550nm [ps/km/nm]	分散スロープ at 1550nm [ps/km/nm ²]	曲げ損 at 20 ϕ , 1550nm [dB/m]
14(表1)	1.47	89.5	11.00	14.01	0.067	6.4
16(表1)	1.62	104.2	11.83	14.60	0.074	6.1

【0052】

★ ★【表5】

試料番号	カットオフ波長 [μ m]	Aeff at 1550nm [μ m ²]	MFD at 1550nm [μ m]	波長分散値 at 1550nm [ps/km/nm]	分散スロープ at 1550nm [ps/km/nm ²]	曲げ損 at 20 ϕ , 1550nm [dB/m]
1(表2)	1.38	86.1	9.13	7.80	0.073	2.1

【0053】

☆ ☆【表6】

試料番号	カットオフ波長 [μ m]	Aeff at 1550nm [μ m ²]	MFD at 1550nm [μ m]	波長分散値 at 1550nm [ps/km/nm]	分散スロープ at 1550nm [ps/km/nm ²]	曲げ損 at 20 ϕ , 1550nm [dB/m]
4(表2)	1.48	106.4	9.55	10.43	0.077	6.5

【0054】このように、第1ないし第2の例の分散シフト光ファイバは、1490~1625 μ mから選択される使用波長帯における波長分散値が、一般的な1.3 μ m用シングルモード光ファイバと比べて小さいため、DCFあるいはSCDCFと組み合わせた光通信システムにおいて、一般的な1.3 μ m用シングルモード光ファイバを使用した場合と比較してDCFあるいはSCDCFの使用長さを短くすることができる。また、分散シ

フト光ファイバ自体のAeffが大きいことから、非線形光学効果を抑制し、伝送特性の向上を図ることができるため、ハイパワー信号光の伝送に好適である。また、分散スロープが小さいため、波長多重伝送に適している。DCFあるいはSCDCFは特に限定されないが、例えば、いわゆるW型やセグメントコア付W型などの屈折率分布形状を有する既存のものなどを用いることができる。

【0055】

【発明の効果】以上説明したように本発明においては、
1490～1625 μm から選択される使用波長帯にお
ける波長分散値が一般的な1.3 μm 用シングルモード
光ファイバと比べて小さいため、DCFあるいはSCD
CFと組み合わせた光通信システムにおいて、一般的な
1.3 μm 用シングルモード光ファイバを使用した場合
と比較してDCFあるいはSCDCFの使用長さを短く
することができる。その結果、システムのコストを低減
し、かつ伝送特性の向上を図ることができる。また、分
散シフト光ファイバ自体のAeffが大きいことから
も、非線形光学効果を抑制し、伝送特性の向上を図るこ
とができるため、ハイパワー信号光の伝送に好適であ
る。また、分散スロープが小さいため、波長多重伝送に
適している。また、比較的簡単な屈折率分布形状を有す
るため、製造時に制御すべき構造パラメータの数が少な
く、製造上有利であり、所望の特性が効率よく得られ
る。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の分散シフト光ファイバの屈折率分布
形状の第1の例（デュアルシェイブコア型）を示した図
である。

【図2】 本発明の分散シフト光ファイバの第2の例
（リング型）の屈折率分布形状の一例を示した図であ*

*る。

【図3】 実際のものに近いリング型の屈折率分布形
状の例を示した図である。

【図4】 オリング型の屈折率分布形状を有する光ファ
イバと、単峰型の屈折率分布形状の光ファイバにおい
て、曲げ損失を10dB/mに一定に保った状態で波長
分散値を変化させたときのAeffと分散スロープの変
化を示したグラフである。

【図5】 図5（a）～図5（c）は、従来の分散シフ
ト光ファイバの屈折率分布形状の例を示した図であり、
図5（d）は、1.3 μm 用シングルモード光ファイバ
の一般的な屈折率分布形状である単峰型の屈折率分布形
状を示した図である。

【図6】 第1の例の分散シフト光ファイバに係る実施
例の結果を示したグラフである。

【図7】 第1の例の分散シフト光ファイバに係る他の
実施例の結果を示したグラフである。

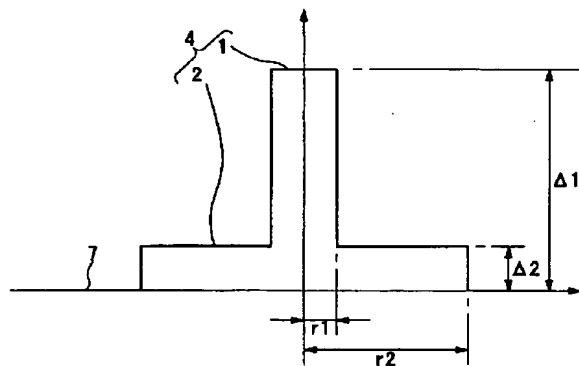
【図8】 第2の例の分散シフト光ファイバに係る実施
例の結果を示したグラフである。

【図9】 第2の例の分散シフト光ファイバに係る他の
実施例の結果を示したグラフである。

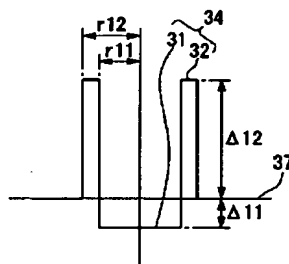
【符号の説明】

1、31…中心コア部、2…階段コア部、4、34…コア
ア、7、37…クラッド、32…周辺コア部。

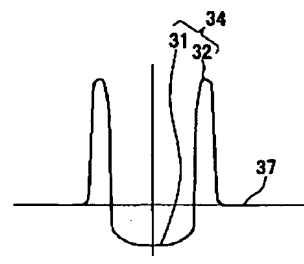
【図1】



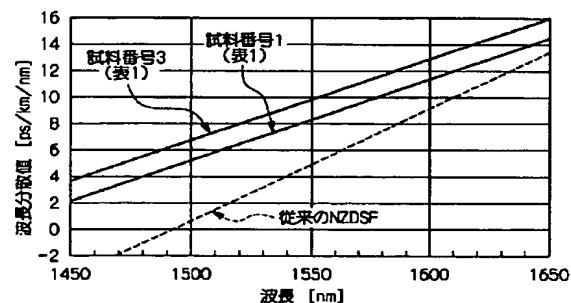
【図2】



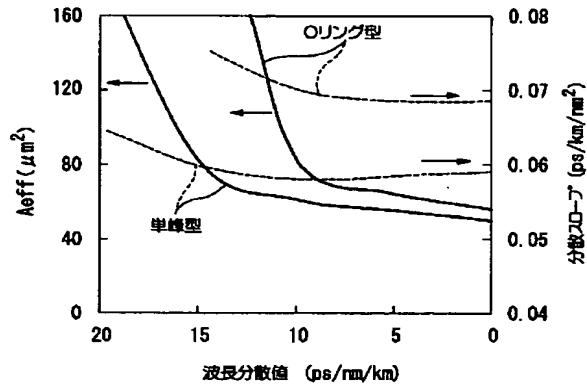
【図3】



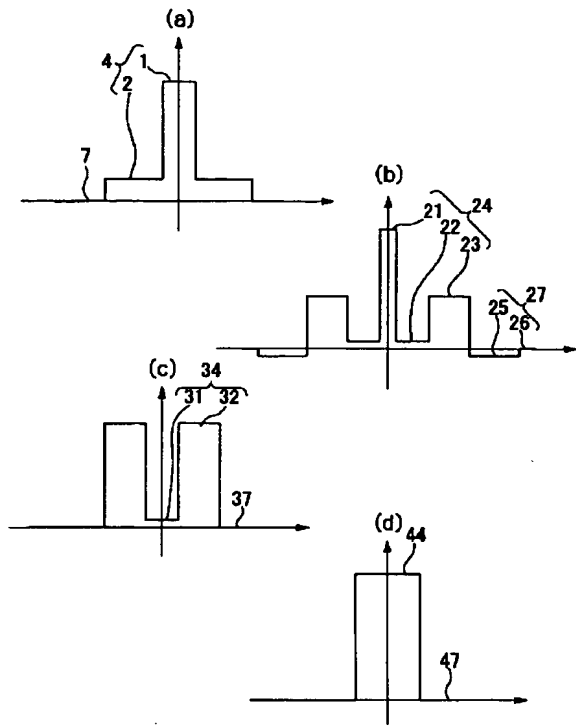
【図6】



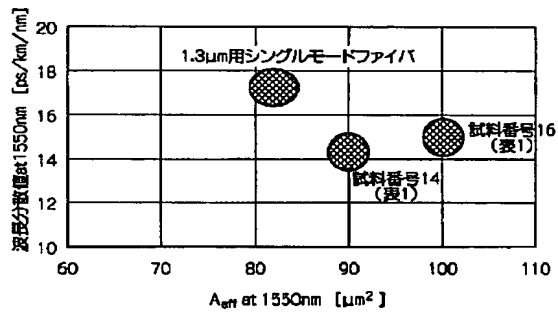
【図4】



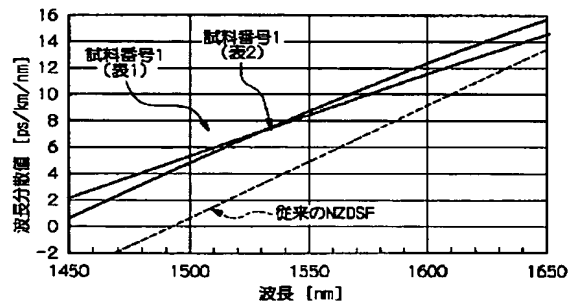
【図5】



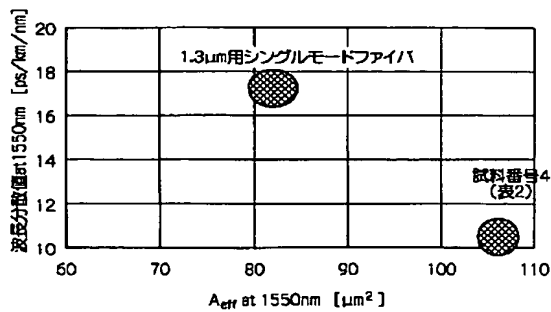
【図7】



【図8】



【図9】



フロントページの続き

(72)発明者 畔蒜 富夫
千葉県佐倉市六崎1440番地 株式会社フジ
クラ佐倉事業所内

F ターム(参考) 2H050 AB04Y AB05X AC09 AC16
AC28 AC71 AC73 AC75 AC76
AD00

【公報種別】特許法第17条の2の規定による補正の掲載
 【部門区分】第6部門第2区分
 【発行日】平成13年11月22日(2001.11.22)

【公開番号】特開2001-147338(P2001-147338A)
 【公開日】平成13年5月29日(2001.5.29)
 【年通号数】公開特許公報13-1474
 【出願番号】特願2000-272130(P2000-272130)
 【国際特許分類第7版】

G02B 6/16
 6/22

【F I】

G02B 6/16
 6/22

【手続補正書】

【提出日】平成13年4月9日(2001.4.9)

【手続補正1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】請求項6

【補正方法】変更

【補正内容】

【請求項6】請求項5に記載の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_1 、階段コア部の半径を r_2 、クラッドを基準にしたときの中心コア部の比屈折率差を Δ_1 、階段コア部の比屈折率差を Δ_2 としたとき、
 Δ_1 が0.4～0.5%、
 r_2/r_1 が3.5～5.0、
 Δ_2/Δ_1 が0.025以上であって、かつ $-0.06 \times (r_2/r_1) + 0.5$ で求められる値以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバ。

【手続補正2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】請求項8

【補正方法】変更

【補正内容】

【請求項8】請求項7に記載の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_1 、階段コア部の半径を r_2 、クラッドを基準にしたときの中心コア部の比屈折率差を Δ_1 、階段コア部の比屈折率差を Δ_2 としたとき、
 Δ_1 が0.4～0.5%、
 r_2/r_1 が2.0～4.0、
 Δ_2/Δ_1 が0.025以上であって、かつ $-0.06 \times (r_2/r_1) + 0.5$ で求められる値以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバ。

【手続補正3】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】請求項12

【補正方法】変更

【補正内容】

【請求項12】請求項11に記載の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_{11} 、周辺コア部の半径を r_{12} 、クラッドを基準にしたときの中心コア部の比屈折率差を Δ_{11} 、周辺コア部の比屈折率差を Δ_{12} としたとき、

1. $3 \leq r_{12}/r_{11} \leq 2.5$ 、 $\Delta_{11} \leq 0.3\%$ 、 $\Delta_{12} \geq 0.5\%$ 、 $(\Delta_{12} - \Delta_{11}) \leq 1.2\%$ 、 $0.9 \leq \Delta_{12} \times r_{12}/r_{11} \leq 1.7$ であり、かつ、 $\Delta_{11} = a \times \Delta_{12} + b$ としたとき、
 a が r_{12}/r_{11} の関数 $c \times (r_{12}/r_{11} - 1)$ で表され、 c が1.5～2.0であり、
 b が r_{12}/r_{11} の関数 $0.4 \times (r_{12}/r_{11}) + e$ で表され、 e が0～0.4であることを特徴とする分散シフト光ファイバ。

【手続補正4】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0017

【補正方法】変更

【補正内容】

【0017】具体的には以下のような解決手段を提案する。第1の発明は、1490～1625nmから選択される使用波長帯において、波長分散値が7～15ps/km/nm、 A_{eff} が60～150 μm^2 、分散スロープが0.09ps/km/nm²以下、曲げ損失が100dB/m以下であり、かつ実質的にシングルモード伝搬となるカットオフ波長を有することを特徴とする分散シフト光ファイバである。第2の発明は、第1の発明の分散シフト光ファイバにおいて、高屈折率の中心コア部と、その外周上に設けられた、該中心コア部よりも低屈折率の階段コア部と、該階段コア部の外周上に設けられた、該階段コア部よりも低屈折率のクラッドとからなる屈折率分布形状を有することを特徴とする分散シフト

光ファイバである。第3の発明は、第2の発明の分散シフト光ファイバにおいて、 A_{eff} が $60 \sim 110 \mu m^2$ 、分散スロープが $0.08 ps/km/nm^2$ 以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第4の発明は、第3の発明の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_1 、階段コア部の半径を r_2 、クラッドを基準としたときの中心コア部の比屈折率差を Δ_1 、階段コア部の比屈折率差を Δ_2 としたとき、 Δ_1 が $0.25 \sim 0.55\%$ 、 r_2/r_1 が $1.5 \sim 5.0$ 、 Δ_2/Δ_1 が 0.025 以上であって、かつ $-0.06 \times (r_2/r_1) + 0.5$ で求められる値以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第5の発明は、第3の発明の分散シフト光ファイバにおいて、波長分散値が $7 \sim 11 ps/km/nm$ 、 A_{eff} が $60 \sim 80 \mu m^2$ 、分散スロープが $0.07 ps/km/nm^2$ 以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第6の発明は、第5の発明の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_1 、階段コア部の半径を r_2 、クラッドを基準にしたときの中心コア部の比屈折率差を Δ_1 、階段コア部の比屈折率差を Δ_2 としたとき、

Δ_1 が $0.4 \sim 0.5\%$ 、 r_2/r_1 が $3.5 \sim 5.0$ 、 Δ_2/Δ_1 が 0.025 以上であって、かつ $-0.06 \times (r_2/r_1) + 0.5$ で求められる値以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第7の発明は、第3の発明の分散シフト光ファイバにおいて、波長分散値が $12 \sim 15 ps/nm/km$ 、 A_{eff} が $90 \sim 110 \mu m^2$ 、分散スロープが $0.08 ps/km/nm^2$ 以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第8の発明は、第7の発明の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_1 、階段コア部の半径を r_2 、クラッドを基準にしたときの中心コア部の比屈折率差を Δ_1 、階段コア部の比屈折率差を Δ_2 としたとき、

Δ_1 が $0.4 \sim 0.5\%$ 、 r_2/r_1 が $2.0 \sim 4.0$ 、 Δ_2/Δ_1 が 0.025 以上であって、かつ $-0.06 \times (r_2/r_1) + 0.5$ で求められる値以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第9の発明は、第1の発明の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の外周上に、該中心コア部よりも高屈折率の周辺コア部が設けられ、該周辺コア部の外周上に、該周辺コア部よりも低屈折率のクラッドが設けられてなる屈折率分布形状を有することを特徴とする分散シフト光ファイバである。第10の発明は、第9の発明の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_{11} 、周辺コア部の半径を r_{12} 、クラッドを基準にしたときの中心コア部の比屈折率差を Δ_{11} 、周辺コア部の比屈折率

差を Δ_{12} としたとき、 $1.3 \leq r_{12}/r_{11} \leq 2.5$ 、 $\Delta_{11} \leq 0.3\%$ 、 $\Delta_{12} \geq 0.5\%$ 、 $(\Delta_{12} - \Delta_{11}) \leq 1.2\%$ 、 $0.9 \leq \Delta_{12} \times r_{12}/r_{11} \leq 1.7$ であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第11の発明は、第9の発明の分散シフト光ファイバにおいて、 A_{eff} が $70 \sim 100 \mu m^2$ 、分散スロープが $0.07 ps/km/nm^2$ 以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第12の発明は、第11の発明の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_{11} 、周辺コア部の半径を r_{12} 、クラッドを基準にしたときの中心コア部の比屈折率差を Δ_{11} 、周辺コア部の比屈折率差を Δ_{12} としたとき、 $1.3 \leq r_{12}/r_{11} \leq 2.5$ 、 $\Delta_{11} \leq 0.3\%$ 、 $\Delta_{12} \geq 0.5\%$ 、 $(\Delta_{12} - \Delta_{11}) \leq 1.2\%$ 、 $0.9 \leq \Delta_{12} \times r_{12}/r_{11} \leq 1.7$ であり、かつ、 $\Delta_{11} = a \times \Delta_{12} + b$ としたとき、 a が r_{12}/r_{11} の関数 $c \times (r_{12}/r_{11} - 1)$ で表され、 c が $1.5 \sim 2.0$ であり、 b が r_{12}/r_{11} の関数 $0.4 \times (r_{12}/r_{11}) + e$ で表され、 e が $0 \sim 0.4$ であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第13の発明は、第9の発明の分散シフト光ファイバにおいて、 A_{eff} が $90 \sim 150 \mu m^2$ 、分散スロープが $0.08 ps/km/nm^2$ 以下であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第14の発明は、第13の発明の分散シフト光ファイバにおいて、中心コア部の半径を r_{11} 、周辺コア部の半径を r_{12} 、クラッドを基準にしたときの中心コア部の比屈折率差を Δ_{11} 、周辺コア部の比屈折率差を Δ_{12} としたとき、 $1.3 \leq r_{12}/r_{11} \leq 2.5$ 、 $\Delta_{11} \leq 0.15\%$ 、 $\Delta_{12} \geq 0.5\%$ 、 $(\Delta_{12} - \Delta_{11}) \leq 1.2\%$ 、 $1.0 \leq \Delta_{12} \times r_{12}/r_{11} \leq 1.5$ であることを特徴とする分散シフト光ファイバである。第15の発明は、第1～14の発明のいずれの分散シフト光ファイバと、その波長分散を補償する分散補償光ファイバ、あるいは波長分散および分散スロープを補償する分散スロープ補償分散補償光ファイバとを組み合わせ用いたことを特徴とする光通信システムである。

【手続補正5】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0033

【補正方法】変更

【補正内容】

【0033】また、この第1の例の分散シフト光ファイバは、上述のように波長分散値によって主に従来のNZDSFよりも良好な特性を得ることができるものと、主に $1.3 \mu m$ 用シングルモード光ファイバよりも良好な特性を図ることができるものの二つに大別することができる。以下それぞれについて説明する。

1.1 A_{eff} の拡大と分散スロープの低減を両立したNZDSF

この場合は、波長分散値を $7 \sim 11 \text{ ps/km/nm}$ の範囲に設定する。従来のNZDSFの一般的な波長分散値(6 ps/km/nm 以下)よりも大きくすることにより、 A_{eff} の拡大と分散スロープの低減を両立することができる。なお、このように波長分散値を正分散側にシフトさせることは、4光子混合抑制の観点において有利である。また、この程度の波長分散値であれば、中継距離によっては問題にならない程度の累積分散が得られ、また、より長距離のシステムにおいては、適切なDCFやSCDCFと組み合わせることにより、残留分散を抑制したシステムを構築することができる。

すなわち、この分散シフト光ファイバにおいては、 A_{eff} を $60 \sim 80 \mu\text{m}^2$ 、分散スロープを 0.07 ps/km/nm^2 以下とすることができる。その結果、非線形光学効果を従来のNZDSFと同等以上に抑制することができ、かつ波長多重伝送に適したものを提供することができる。また、シングルモード伝搬を保証できるカットオフ波長の設定がさらに容易となる。この分散シフト光ファイバにおいては、 $\Delta 1$ を $0.4 \sim 0.5\%$ 、 r_2/r_1 を $3.5 \sim 5.0$ 、 $\Delta 2/\Delta 1$ を 0.025 以上であって、かつ $-0.06 \times (r_2/r_1) + 0.5$ で求められる値以下とすることにより、好ましい特性を実現することができる。

【手続補正6】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0034

【補正方法】変更

【補正内容】

【0034】1.2 一般的な $1.3 \mu\text{m}$ 用シングルモード光ファイバよりも A_{eff} を拡大した分散シフト光ファイバ。

この場合は波長分散値を $12 \sim 15 \text{ ps/nm/km}$ に設定する。その結果、 A_{eff} を $90 \sim 110 \mu\text{m}^2$ 、分散スロープを 0.08 ps/km/nm^2 以下とすることができ、一般的な $1.3 \mu\text{m}$ 用シングルモード光ファイバよりも非線形光学効果を抑制することができ、かつ波長多重伝送に適した分散シフト光ファイバを提供することができる。この分散シフト光ファイバにおいては、 $\Delta 1$ を $0.4 \sim 0.5\%$ 、 r_2/r_1 を $2.0 \sim 4.0$ 、 $\Delta 2/\Delta 1$ を 0.025 以上であって、かつ $-0.06 \times (r_2/r_1) + 0.5$ で求められる値以下とすることにより、好ましい特性を実現することができる。

【手続補正7】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0044

【補正方法】変更

【補正内容】

【0044】さらに、この第2の例の分散シフト光ファイバにおいて、 A_{eff} が $70 \sim 100 \mu\text{m}^2$ で、かつ分散スロープが 0.07 ps/km/nm^2 以下という特性を得るためには、上述の r_{12}/r_{11} 、 $\Delta 11$ 、 $\Delta 12$ 、 $\Delta 12 - \Delta 11$ 、 $\Delta 12 \times r_{12}/r_{11}$ の数値範囲を満足するとともに、以下の条件を満足するように設定すると好ましい。

$\Delta 11 = a \times \Delta 12 + b$ としたとき、

a が r_{12}/r_{11} の関数 $c \times (r_{12}/r_{11} - 1)$ で表され、

c が $1.5 \sim 2.0$ であり、

b が r_{12}/r_{11} の関数 $0.4 \times (r_{12}/r_{11}) + e$ で表され、

e が $0 \sim 0.4$ である。